

世纪之交 矿物学岩石学地球化学的 回顾与展望

欧阳自远 主编



原子能出版社

前 言

新世纪的到来,新的千年的来临,充满着新的机遇与挑战。

20 世纪科学技术推动人类社会向知识经济社会转变;21 世纪的科学技术将愈益社会化,社会则将愈益科学技术化。科学技术不仅是经济增长和社会发展的支配力量,也将深刻地改变人类的思维方式和生存方式,使人类社会终于走上可持续发展的道路。

在世纪之交的今天,使人类社会与自然界协调发展是地球科学的历史使命。矿物学、岩石学与地球化学是地球科学的基础学科。在新世纪到来之际,科技工作者既要进行深层次的反思,更要制订进一步的学科发展战略;探讨如何适应时代的进步与社会的需求,并加速推动其发展,把握好学科自身演进的规律,探索结合我国实际,发挥优势与立意创新,跻身世界先进行列的发展之路。

鉴于上述考虑,在酝酿举办第六届全国矿物岩石地球化学学术交流会时,我们建议将“世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望”作为其中中心议题,这个建议得到常务理事会(扩大)会议的赞同,与会者并补充、修改和充实了具体内容,使这次会议既成为 1991 年本会在合肥召开的第四届学术年会中心议题“矿物学向何处去? 岩石学向何处去? 地球化学向何处去?”的延续和深化,又能反映近年来地球科学逐渐走出低谷跨上可持续发展康庄大道的“世纪之交”之特色。会议在广泛征文的基础上,又邀请本会各有关学科的学者,在已有深厚积累、深刻思考的基础上,就各领域的现状、前沿领域、突破口与发展前景提出见解,集思广益,各抒己见。

在本届学术年会召开之际,适逢中国矿物岩石地球化学学会成立 20 周年。20 年来,学会在团结地学界同仁、开展学术活动、促进学科发展,以及正确的学术导向方面做了大量工作,其中一项是每十年要编辑出版一部各学科的研究现状与发展趋势的论文集,会同挂靠单位在 60 年代出版了《地质地球化学参考资料》,以后相继出版了《70 年代地质地球化学进展》、《80 年代地质地球化学进展》及《80 年代中国矿物学岩石学地球化学研究回顾》,以如实记录我国矿物学岩石学地球化学发展的历程,并对以后十年的发展有所启迪;值此世纪之交,我们认为出版一部《世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望》是适时而有意义的。从现在编辑完成的这本书的内容来看,既有大的学科的发展历程和趋势,也有相邻学科与各分支学科、研究领域,以至一些专题、研究热点的回顾与展望。尽管未能对下一个世纪的发展都作出全面的预测,但给人的提示和启迪是不言而喻的。

《世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望》的出版虽然是学会成立 20 年来学术方面的一个不完整的总结,权且作为给新世纪的微薄献礼,更多的是期望着对读者的工作和今后的学科发展有所裨益。

中国矿物岩石地球化学学会理事长

欧阳自远

1998 年 4 月 27 日

目 次

一、矿物学

天然产出的地幔超高压矿物及其组合——陨石冲击脉体微矿物学研究的重要新进展	谢先德 陈 鸣(1)
世纪之交工艺矿物学的发展与展望	彭明生 梁金龙 李迪恩等(7)
成因矿物学找矿矿物学新进展	陈光远 孙岱生(12)
我国矿物材料研究现状及几个应该重视的发展方向	廖立兵(15)
主要造岩矿物晶体化学研究的回顾与现状	薛纪越 罗谷风(20)
元素碳和富氏碳研究概况	郑 轶 叶大年 郝 伟(25)
对称性理论的新进展	陈敬中 张汉凯 车 遥等(30)
粘土矿物催化剂应用新进展	肖金凯 荣天君(35)
间层矿物研究新进展	秦 善 曹正民(40)
富钾岩石矿制取钾肥的现状和前景	王辅亚 冯 璞 王德强等(46)
21 世纪矿物学展望:广义矿物学	孙传敏 陶 专 何政伟(49)
我国微细浸染型金矿原生矿石工艺研究进展	毛德明 黎文辉(52)
我国铀矿物研究的回顾与前瞻	陈代演 王 华 任大根等(56)
微细浸染型金矿原生矿石焙烧氧化工艺矿物学研究进展 ..	黎文辉 毛德明 侯莹莹等(58)
微生物与矿物	连 宾(61)

二、岩石学

火山岩和火山作用与资源环境关系研究的若干问题	李兆鼎(64)
高压麻粒岩研究的进展与展望	耿元生(68)
超高压变质岩系的形成与回返机制	庄育勳(73)
岩浆混合作用与底侵作用	
..... 中国矿物岩石地球化学学会岩浆岩专业委员会(周新民执笔)(82)	
90 年代以来我国变质岩石学和变质地质学研究的若干进展	
..... 沈其韩 庄育勳 耿元生(86)	
关于发展岩石学之我见	解广鑫(94)
岩石圈-软流圈系统的形成与演化	邓晋福 赵海玲 罗照华等(97)
变质岩石学的若干进展和发展趋势	王仁民(105)
富钾火山岩的研究进展与展望	邱检生 王德滋(108)
花岗质岩石中暗色微粒包体成因研究进展与展望	毕 华 王中刚(114)

90年代以来我国地幔岩石学的回顾与展望	路凤香 郑建平(118)
镁铁质麻粒岩捕虏体与壳—幔相互作用	樊祺诚 李 竟 刘若新等(123)
碳酸岩-碱性岩杂岩体中包裹体的研究进展	倪 培 沈 昆(127)
火成碳酸岩研究现状	刘 焰 赵善仁 孙世华(131)
岩石学、地球化学在我国火山学研究中的应用与发展	李 竟 刘若新 魏海泉(136)
论伟晶岩不同成因	李兆麟(140)
碱性岩研究进展	张玉泉 谢应雯(144)
蒸发岩生物化学成因说综述	魏东岩(146)
从煤层的成因研究煤的洗选特性	代世峰 吕保平 侯慧敏等(150)
黑色页岩的成因与有机质保存条件	吴朝东 杨承运(153)

三、地球化学

跨越世纪:地球化学的理论与应用	赵伦山 赵善仁 叶 荣(159)
世纪之交的实验地球化学:进展与展望	
中国矿物岩石地球化学学会实验矿物岩石地球化学专业委员会(吴福元、林 强执笔)(168)	
迈向 21 世纪的地幔地球化学和岩石圈深部研究	
中国矿物岩石地球化学学会地幔矿物岩石地球化学专业委员会(周新华、孙 敏执笔)(172)	
中国天体化学研究展望	欧阳自远 王世杰(176)
中国煤成气的地球化学进展梗概	戴金星(182)
我国实验地球化学研究回顾(1991~1997)	曹貽善(189)
天体化学和空间化学研究进展与展望	林杨挺 王道德 欧阳自远(192)
再论壳幔相互作用的普遍性及其深部动力学意义	周新华(203)
全球环境变化的同位素标记研究进展	洪业汤(206)
中国海洋地球化学研究若干进展与展望	赵一阳 李凤业 何丽娟(213)
成矿古流体氮、氩同位素地球化学	胡瑞忠(216)
我国包裹体研究工作二十年	
..... 中国矿物岩石地球化学学会包裹体专业委员会(徐国庆执笔)(221)	
熔融包裹体与幔源岩浆多样性	樊祺诚 刘若新(224)
我国火山学研究进展与展望	
..... 中国矿物岩石地球化学学会火山与地球内部化学专业委员会(刘若新执笔)(228)	
从同位素到板块构造:化学地球动力学	郑永飞 李曙光 陈江峰(233)
地球物质科学——地学新学科	於崇文(238)
静态超高压高温下就位物性测量实验研究的新进展	谢鸿森 张月明 郭 捷等(242)
古生代海洋地球化学	邹永廖 王世杰(246)
环境地球化学与健康:回顾与展望	郑宝山(251)
气溶胶研究进展	祁士华 傅家谟 盛国英(255)
对矿床地球化学发展的一些认识	李朝阳(258)
分形理论在地质地球化学中的应用	张哲儒 毛华海(262)

环境有机地球化学研究若干进展·····	张 干 盛国英 麦碧娴等(266)
地球化学层析成像研究的前景与意义·····	朱炳泉(272)
流体运移过程的地球化学研究进展·····	滕彦国 倪师军 张成江(275)
地下流体稀有气体地球化学研究·····	徐永昌 刘文汇 沈 平等(279)
流体作用地质地球化学·····	刘丛强(284)
成矿流体地球化学研究的若干进展·····	张德会(290)
地质流体活动的同位素定年方法评述·····	刘建明 赵善仁 沈 洁等(295)
水的物理化学性质的分子动力学研究综述·····	张毅刚(301)
从成岩与成矿基本问题的比较看矿床地球化学的发展·····	邓海琳(309)
应用地球化学的蓬勃兴起——21世纪地球化学发展的必然趋势·····	金成洙 王建国 姚玉增等(312)
古海洋热水沉积体系的多样性和演化——对华南地区热水沉积研究的简单回顾·····	周永章 陈多福 梁华英等(315)
世纪之交的高温高压实验地球化学·····	李建平 翁克难 谢鸿森(318)
MDD模式与构造-热年代学进展·····	陈文寄 李 齐(322)
地幔流体的碳同位素地球化学·····	储雪蕾(327)
湖泊地球化学与气候变化·····	黄 麒(334)
成矿理论若干领域研究动态及发展趋势·····	方适宜(339)
构造地球化学研究进展与发展趋势·····	吴学益 杨元根(343)
断裂构造地球化学的研究进展和发展方向·····	钱建平(347)
阔步前进中的我国勘查地球化学·····	任天祥(352)
自然界稳定锂同位素的变异·····	韩凤清(355)
古灾害地质学·····	方国庆(357)
澳大利亚土壤环境地球化学研究进展·····	刘康怀(360)

四、沉积学

我国岩相古地理学的形成、发展与展望·····	中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会(冯增昭执笔)(365)
岩相古地理研究的回顾与展望·····	刘宝珺(368)
沉积盆地研究的基本趋向和对我国今后研究的设想·····	孙 枢 李思田 王成善(373)
我国含油气盆地研究进展·····	田在艺(379)
盆地流体及其成矿作用评述·····	刘建明 刘家军(384)
湖泊沉积与环境变化·····	王苏民 李玉成(390)
中国煤地球化学的进展与展望·····	韩德馨 任德贻 赵峰华(396)
走向世界的中国第四纪研究·····	韩家懋(401)
含油气储层沉积学研究回顾与展望·····	罗 平 裴泽楠 薛叔浩等(408)

天然产出的地幔超高压矿物及其组合

——陨石冲击脉体微矿物学研究的重要新进展

谢先德 陈 鸣

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

关键词 陨石 冲击 高压矿物

1 绪 言

近半个世纪以来,人们对探索地球和行星深部的构造和动力现象、早期分异和演化过程,对地球深部超高压下矿物的组成、结构、相变、热力学以及一系列物理性质等作了大量的实验模拟。天然产出的超高压矿物研究也取得了丰富的资料。由于在超高压条件下物质呈现出全新的内容,人们已认识到高压与温度、成分两个变数相类似,对物质具有等同的控制作用^[1]。目前,多砷高压实验已达到几百亿帕的静压,金刚石压砧产生的最高静压已超过 500 GPa,达到了相当于地核的压力,这使得模拟地球和星球深部超高压下的物态和性质已成为现实。

天然产出的超高压矿物研究与实验超高压矿物研究具有同等的重要性,它回答实验室所发现的高压多型是否真正存在于自然界,同时那些首先发现于自然界的高压矿物及其组合又为实验研究指出了方向,为探索地球和星球深部物质组成提供新的线索。由于目前天然产出的超高压矿物的主要产状是冲击变质岩石,因而天然冲击变质研究就为地球和星球深部超高压下的物态和性质研究提供了重要资料。自然界冲击变质是一种压力极高、作用时间较短(秒或微秒级)的动态高压变质作用。陨石、小行星和彗星的高速碰撞会引起受作用岩石发生明显的冲击变质,如大的陨星体撞击行星体引起的冲击波产生的高压可达数百、数千亿帕以上以及高温,引起受作用的岩石和矿物发生显著的物理和化学变化。

1953年, Coes^[2]首次人工合成了石英的高压多型柯石英。1960年,赵景德等^[3,4]在美国亚利桑那州的梅蒂尔陨石坑(Meteor Crater)砂岩中发现了天然产出的柯石英,1962年又发现了另一个高压多型斯石英。自 Merrill^[5]首先在梅蒂尔坑岩石中发现了冲击变质现象以来,天然石英高压多型的发现就成为鉴别天然冲击变质的最可靠判据之一,因而柯石英和斯石英的发现就成为冲击变质研究历史的一个重要里程碑,推动了冲击变质研究和其它天然超高压矿物的发现进程。从 50 年代到 70 年代,大量的高压实验指出,橄榄石和辉石等地壳和上地幔主要造岩矿物,随着压力(深度)和温度增加将分别转变为 β 和 γ 尖晶石及石榴子石结构。1969年, Binn 等^[6]在球粒陨石冲击脉体中发现了天然的橄榄石的高压多型林伍德石(ringwoodite, γ -尖晶石);1970年, Smith 和 Mason^[7]在陨石中发现了天然的辉石高压多型镁铁榴石(majorite);1983年, Price 等^[8]在陨石中发现了天然的橄榄石的高压多型瓦茨利石(wadsleyite, β -尖晶石)。本世纪 60 年代后期以来空间科学和技术的迅速发展,冲击变质研究受到高度重视并在地质学

和陨石学中成为一门分支科学^[9],并在近 40 年得到了不断发展。天然岩石和矿物样品,特别是受强烈冲击的球粒陨石和陨石坑岩石的冲击变质研究,为探讨地幔超高压矿物组成和天然冲击事件的压力温度历史提供了参考依据。

现代微束分析技术和微矿物学研究方法的迅猛发展,促进了地幔超高压矿物学和冲击变质领域的研究。谢先德等^[10-11]以研究冲击石英微结构为基础取得了一系列新成果,发展了一套系统研究受冲击矿物的物理和化学性质和内部微结构的先进微矿物学方法并发表了两本专著^[12-13]。根据这套方法,我们从 1991 年初以来对天然受强烈冲击陨石展开的一系列深入的微矿物学研究和国际合作,取得了重要成果,先后在德国、美国、日本、丹麦、捷克和我国召开的 11 次重要国际会议上作了口头学术报告,发表论文 30 多篇^[14-43],这些研究成果引起国际陨石学界和天体矿物学界的重视,推动了德国、美国、日本等国学者在该领域的研究,仅 1997 年就有 4 篇有关论文在《*Science*》和《*Nature*》杂志上发表。为促进冲击变质研究领域的发展,我们最近总结提出了“动态高压矿物学”这一矿物学的新发展方向^[17-41]。

2 天然产出的地幔超高压矿物及其组合研究的主要成果

2.1 已知高压矿物的发现

天然产出的超高压矿物与冲击成因密切相关。石英高压多型柯石英^[3]和斯石英^[4]在美国梅蒂尔坑和德国雷斯坑等冲击陨石坑岩石中都有发现,它们是由原砂岩或花岗岩中石英在高压高温下发生固态转变而形成的高压多型。实验表明,石英在高于 4 GPa 和 10 GPa 静态下,分别转变为柯石英和具有硅氧八面体结构的斯石英。随后人们曾在金伯利岩金刚石包体和超变质带榴辉岩中发现了柯石英。与地球陨石坑有成因关系的高压矿物还有冲击成因的金刚石,目前在德国雷斯坑等一系列陨石坑岩石中,已发现由碳质石墨发生固态转变形成的金刚石。

橄榄石和辉石的高压多型的唯一天然产状是低铁群球粒陨石冲击脉体。在宇宙空间经受过强烈碰撞和冲击变质球粒陨石通常由强烈变形的球粒陨石主体部分和冲击脉体构成。冲击脉体具有球粒陨石总体化学成分特征,是在冲击波引起的极高压力和温度作用下发生部分或全岩熔融而形成的熔融脉体。Binn 等^[6]首先在 Tenham 陨石冲击脉体中发现了橄榄石的高压多型林伍德石。Smith 和 Mason^[7]在 Coorara 陨石冲击脉体中发现了辉石的高压多型镁铁榴石。Price 等^[8]在 Peace River 陨石冲击脉体中发现了橄榄石的高压多型瓦茨利石。林伍德石、瓦茨利石和镁铁榴石被认为是构成地球过渡带(transition zone)的主要矿物组分。目前人们已在近 30 个低铁群球粒陨石冲击脉体中找到了这些高压矿物。

2.2 新高压矿物的发现

寺巷口陨石是 1989 年陨落 in 江苏的一个受强烈冲击变质的低铁群球粒陨石。我们在该陨石冲击脉体中新发现了与氯磷灰石相同化学成分的一个新相——A 相^[24]。A 相结构既不同于常见的三方晶系的氯磷灰石,又不同于具有单斜结构的氯磷灰石低温多型。该相呈重结晶的多晶集合体产出,并与林伍德石、镁铁榴石和镁方铁矿等高压矿物共同产于冲击脉体中,这表明它是由球粒陨石中原氯磷灰石在高温高压下发生固态转变而成的更为致密的高压矿物多型。这是磷酸盐类高压相的第一发现,为地幔稀有微量和稀土元素载体研究提供了新的依据。

Sharp 等^[44]和 Tomioka 等^[45]分别在 Acfer 040 球粒陨石和 Tenham 球粒陨石冲击脉体中

发现了新的高压矿物 MgSiO_3 -ilmenite 和 MgSiO_3 -perovskite, 两球粒陨石冲击脉体中发现的这些高压相产出特征有一定的区别, Acfer 040 中的 MgSiO_3 -ilmenite 和 MgSiO_3 -perovskite 是从稠密硅酸盐熔体中固化结晶的^[44], 而 Tenham 的 MgSiO_3 -ilmenite 和 MgSiO_3 -perovskite 被实验岩石学和矿物学家们认为是组成地球下地幔的主要矿物。

最近高压矿物的一个最新发现是, 在受强烈冲击的 SNC(火星)陨石 Shergotty(Eucrite)中发现了由 β -鳞石英转变而成具有 α - PbO_2 结构的 SiO_2 新高压多型^[46]。这是继柯石英和斯石英后发现的、在更高压力下形成的第三个天然产状的 SiO_2 高压多型。由于实验揭示 MgSiO_3 -perovskite 在下地幔是不稳定和会崩解为 $\text{MgO} + \alpha$ - PbO_2 结构 SiO_2 组合, α - PbO_2 结构 SiO_2 高压相的发现对下地幔矿物学和动力学均具有重要意义。据最新消息, El Goresy 等在该陨石中又发现了天然的、具 ZrO_2 结构的第四种 SiO_2 高压多型, 其形成压力大于 85 GPa, Si 的配位数为 7。

2.3 高压矿物组合的发现

由于陨石冲击脉体是高压矿物的主要天然产状, 因此对冲击脉体的研究长期受到人们的关注。但值得指出的是, 过去国内外的研究一般侧重于对冲击脉体中粗颗粒部分的分析, 而对脉体基质的组成未给予足够的重视, 因而漏掉了一些重要的资料。

我们在高压矿物组合研究的重要发现之一, 是在寺巷口陨石冲击脉体中揭示了天然高压矿物的两种组合^[21, 29], 即由原橄榄石和辉石经固态相转变而形成的林伍德石和镁铁榴石多晶集合体组合, 和从冲击产生的稠密硅酸盐熔体中结晶的镁铁-镁铝石榴子石和镁方铁矿微晶组合。基于 Allende 陨石静态多砧实验获得的相平衡资料^[47, 48], 寺巷口陨石冲击脉体中镁铁-镁铝石榴子石和镁方铁矿是有关 23~25 GPa 和 2 000℃ 的稳定相组合。这是首次发现从冲击脉体的结晶产物可以与静态高压实验相比较的矿物组合证据。

继寺巷口陨石研究取得重要突破后, 我们相继在 Peace River 和 Mbale 陨石(L6)冲击脉体基质中发现了从硅酸盐熔体中结晶的镁铁-镁铝石榴子石和瓦茨利石组合^{[32]①}, 其结晶的 p - T 条件为 15~19 GPa 和 1 800~2 000℃^[48]。在 Tenham 陨石(L6)冲击脉体基质中发现了镁铁-镁铝石榴子石+磁铁矿+金属铁组合^[49], 微结构研究表明其中磁铁矿和金属铁是镁方铁矿发生歧化反应的结果。因此, 推测最初从熔体中结晶的高压组合为镁铁-镁铝石榴子石和镁方铁矿, 该组合与寺巷口陨石冲击脉体基质中高压组合相同, 反映了相似的压力和温度历史。

我们对陨石冲击脉体高压相研究取得的成果, 特别是对熔体基质矿物的研究推动了该领域的新发展。德国 D. Stöffler 教授的研究小组 1997 年 7 月报道在 Acfer 040 球粒陨石冲击脉体中发现了从稠密硅酸盐熔体中结晶的新高压组合 MgSiO_3 -ilmenite + MgSiO_3 -perovskite(呈玻璃质相) + 林伍德石^[44]。日本的 Tomioka 和 Fujino 1997 年 8 月报道在 Tenham 球粒陨石冲击脉体中发现了经辉石固态相转变形成的高压组合 MgSiO_3 -ilmenite 和 MgSiO_3 -perovskite^[45]。这两个研究小组均指出这些高压组合的结晶压力温度约为 26 GPa 和 2 000℃^[44, 45, 50]。在陨石冲击脉体中发现的这一系列天然高压矿物组合, 将加深人们对地球和其它星球深部硅酸盐组成的理解。

2.4 天然冲击变质压力温度历史的新观点

在冲击变质研究中, 人们发现大量的冲击实验到目前均还未能回收到林伍德石、瓦茨利石

① Sharp T G, Chen M, Woenka B 等. 未发表的数据, 1996.

和镁铁榴石等产于陨石冲击脉体的硅酸盐高压矿物!其原因可能是相转变时间和反应动力学问题造成了人工冲击实验回收这类高压矿物的失败,因为一般的冲击实验产生的高压脉冲一般为 $10^{-7}\sim 10^{-5}$ s,而大规模的陨石冲击产生的高压持久度可达 $10^{-2}\sim 10^{-1}$ s^[51]。冲击实验产生的高压脉冲时间太短,不利于硅酸盐高压矿物的形成。然而,过去人们在冲击变质压力温度历史研究中并没有合理地分析对比人工和天然冲击变质的资料,在天然冲击岩石压力温度历史^[52,53]和陨石冲击阶段模式^[54]研究中,不加限制地利用实验资料去比较所有的天然冲击产物,导致结论出现了明显的不确切性。有学者根据冲击实验达56 GPa时橄榄石才出现局部的玻璃化^[55],压力高达70 GPa也未有相转变发生^[56],以及冲击实验的Hugoniot资料等,推测含林伍德石和镁铁榴石等高压矿物的陨石冲击脉体的形成压力范围为50~80 GPa^[53,54,57],这显然过于强调了能量因素而忽视了动力学因素对高压矿物形成的作用。

我们的研究发现,寺巷口陨石冲击脉体中两种高压矿物组合形成的压力和温度为23~25 GPa和2 000 °C,这是受林伍德石的形成和稳定条件以及从高压硅酸盐熔体中结晶的镁铁-镁铝石榴子石和镁方铁矿平衡矿物组合所制约的^[28]。冲击实验的资料在用于解释天然冲击事件时应考虑一定的条件,因为目前实验常用的厘米级大小冲击体产生的高压持久度显然要比天然冲击过程千米级大小冲击体引起的高压持久度短得多。问题的关键是我们陨石冲击脉体中发现了与陨石静态多砧实验结果完全相同的高压矿物组合。经固态相转变而形成的粗粒林伍德石与镁铁榴石多晶集合体中的单晶粒度达6 μm 和10 μm ,冲击脉体基质则经历了从熔融成球粒陨石质稠密硅酸盐熔体和其后结晶出平衡的镁铁-镁铝石榴子石和镁方铁矿组合的过程,这些过程需要达秒级的高压持久度^[28,49]。我们的这一新认识是对动态高压物理理论的新突破。对我们在陨石冲击变质压力和温度历史研究的新发现和提出的新观点,国际著名专家H. Yoder 1995年9月在美国卡内基地球物理实验室评价说这是陨石冲击变质的一个新的里程碑。J. Melosh和T. Ahren 1996年3月在美国休斯顿评论说你们真正校正了冲击的压力和温度并改正了过去的模式。事实表明^[44,45,49],在陨石冲击脉体中发现的高压组合 MgSiO_3 -ilmeneite和 MgSiO_3 -perovskite,支持了我们对陨石冲击变质压力温度历史提出的新观点。

2.5 球粒陨石冲击类型及其与冲击实验结果可比性的新发现

根据球粒陨石的冲击变质特征,我们发现天然受冲击球粒陨石至少可划分为两大类^[31,39,43],即低铁群球粒陨石型(寺巷口类型)和高铁群球粒陨石型(岩庄类型)。两种类型陨石的冲击变质特征和压力温度历史是不相同的,低铁群球粒陨石型冲击脉体的高压脉冲时间较长,可形成各种高压矿物;而高铁群球粒陨石型冲击脉体的高压脉冲时间较短,即使冲击能量极高,也不利于高压矿物的形成,从而不含或含极少量高压矿物。导致低铁群和高铁群球粒陨石的冲击变质特征差异是多因素的,其中发生碰撞的陨石母体体积是主要因素之一,即低铁群球粒陨石母体体积较大。高铁群球粒陨石的冲击变质特征与目前冲击实验的结果十分相似,因此冲击实验的资料可用于比较该陨石群的冲击变质特征和压力温度历史^[43]。

参 考 文 献

- 1 毛河光. 建议加强高压研究. 中国科学院院刊, 1997, (6): 426~427.
- 2 Coes L Jr. A new dense silica. Science, 1953, 118: 131~132.
- 3 Chao E C T, Shormaker E M, Madsen B M. First natural occurrence of coesite. Science, 1960, 132: 220.
- 4 Chao E C T et al. Stishovite, a new mineral from Meteor crater, Arizona. J. Geophys. Res., 1962, 67: 419~421.

- 5 Merrill G P. On a peculiar form of metamorphism in siliceous sandstone. *Proc. U. S. Natl. Mus.*, 1907, 32: 547~551.
- 6 Binn R A, Davis R J, Reed S J B. Ringwoodite, natural $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ spinel in the Tenham meteorite. *Nature*, 1969, 221: 943.
- 7 Smith J V, Mason B. Pyroxene-garnet transformation in Coorara meteorite. *Science*, 1970, 168: 832~833.
- 8 Price G D, Putnis A, Smith D G W. Wadsleyite, natural β $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_4$ from the Peace River meteorite. *Can. Mineral.*, 1983, 21: 29~35.
- 9 French B M, Short N M eds. Shock metamorphism of natural materials. Baltimore Md.: Mono Book Corp., 1968. 644.
- 10 谢先德, 赵景德. 冲击变质石英的光学常数变化范围和微页理分布特征. *矿物学报*, 1982, (2): 81~92.
- 11 谢先德, J. A. 明金, 赵景德. 冲击变质石英的单晶 X 射线研究. *矿物学报*, 1983, (2): 81~91.
- 12 赵景德, 谢先德. 地质研究的微矿物学技术. 北京: 科学出版社, 1989.
- 13 Chao E C T, Xie Xiande. Mineralogical approaches to geological investigations. Beijing: Science Press, 1990. 388.
- 14 陈 鸣, 谢先德. 岩庄陨石橄榄石的冲击效应. *矿物学报*, 1993, 13: 109~114.
- 15 陈 鸣, 谢先德. 天然受冲击寺巷口和蒙巴喇陨石中 α, β 和 γ $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 多型转变过程及矿物学特征. 见: 彭明生, 张惠芬主编. 矿物物理与矿物材料新工艺. 广州: 中山大学出版社, 1995. 4~6.
- 16 谢先德, 陈 鸣. 球粒陨石中高压矿物多型的产出特征. 见: 彭明生, 张惠芬主编. 矿物物理与矿物材料新工艺. 广州: 中山大学出版社, 1995. 1~4.
- 17 谢先德, 陈 鸣. 动态高压矿物学研究的新进展. *岩石矿物学杂志*, 1997, 16(增刊): 239~242.
- 18 Chen Ming, Xie Xiande. A TEM study of Yanzhuang (H6) chondrite. Abstracts of 29th IGC, Kyoto Japan, 1992, 3: 640.
- 19 Chen Ming, Xie Xiande. Raman spectra of orthopyroxene in two natural shocked H chondrites. *Meteoritics*, 1992, 27: 209.
- 20 Chen Ming, Xie Xiande. Vapour phase crystallization of Fe_3S_4 in the severely shocked Yanzhuang H6 chondrite. *Papers of 17th Symp. on Antarctic Meteorites*, Tokyo, Japan, 1992, 198~201.
- 21 Chen Ming, Xie Xiande. The shock effects of orthopyroxene in the heavily shocked meteorites. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38: 1024~1027.
- 22 Chen Ming, El Goresy A. Shock-induced phase transformations in the Sixiangkou chondrite (L6). *Meteoritics*, 1994, 29: 456.
- 23 Chen Ming, Xie Xiande. TEM microstructure of metallic dendrite in the shock-induced melt pocket of the Yanzhuang meteorite. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*, 1995, 8: 337~343.
- 24 Chen Ming, Wopenka B, El Goresy A. Shock-induced ringwoodite (γ -spinel) and wadsleyite (β -modified spinel) in some ordinary chondrites. *Annales Geophysicae*, 1995, 13 (suppl. 3): C732.
- 25 Chen Ming, Wopenka B, Xie Xiande et al. A new high-pressure polymorph of chlorapatite in the shocked Sixiangkou (L6) chondrite. *LPS*, 1995, 26: 237~238.
- 26 Chen Ming, Wopenka B, El Goresy A. Shock-induced transformation exsolution lamellae in olivine in black veins of the Mbale meteorite. *Meteoritics*, 1995, 30: 497~498.
- 27 Chen Ming, Xie Xiande, El Goresy A. Nonequilibrium solidification and microstructures of metal phases in the shock-induced melt of the Yanzhuang (H6) chondrite. *Meteoritics*, 1995, 30: 28~32.
- 28 Chen Ming, Xie Xiande. Na behavior in shock-induced melt phase of the Yanzhuang (H6) chondrite. *European Journal of Mineralogy*, 1996, 8: 325~333.
- 29 Chen Ming, Xie Xiande. High pressure assemblages in the shock veins of Sixiangkou meteorite and their pressure and temperature history. Abstracts 30th IGC, 1996, 2 of 3: 470.
- 30 Chen Ming, Sharp T G, El Goresy A et al. The majorite-pyrope solid solution+magnesiowustite assemblage: constraints on the history of shock veins in chondrites. *Science*, 1996, 271: 1570~1573.
- 31 Chen Ming, Xie Xiande, Chen Bichen. A comparison of thermal histories of the shock veins in two chondritic meteorites. *Papers of 21th Symp. on Antarctic Meteorites*, Tokyo, Japan, 1996, 23~25.
- 32 Chen Ming, Wopenka B, El Goresy A et al. High-pressure assemblages in shock melt vein in the Peace River (L6) chondrite: compositions and pressure-temperature history. *Meteoritics*, 1996, 31 (suppl.): A27.
- 33 Chen Ming, Xie Xiande. Shock effects and history of the Yanzhuang meteorite: a case different from the L-chondrites. Chi-

nese Science Bulletin, 1997, 42: 1889~1894.

- 34 Xie Xiande, Li Zhaohui, Wang Daode et al. The new meteorite fall of Yanzhuang—a severely shocked H6 chondrite with black molten materials. *Meteoritics*, 1991, 26: 411.
- 35 Xie Xiande, Chen Ming. Micromineralogical studies on the severely shocked Yanzhuang H6 chondrite. *Papers of 17th Symp. on Antarctic Meteorites*, Tokyo, Japan, 1992, 7~10.
- 36 Xie Xiande, Li Zhaohui, Wang Daode et al. The new meteorite fall of Yanzhuang—a severely shocked H6 chondrite with black molten materials. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1993, 13: 39~46.
- 37 Xie Xiande, Chen Ming. Nonequilibrium-state microstructures in the heavily shocked rock-forming and metallic minerals. *Abstracts of 16th General Meeting of IMA, Pisa Italy*, 1994, 57.
- 38 Xie Xiande, Chen Ming. Occurrence of high-pressure mineral polymorphs in two shocked chondrites. *Papers of 20th Symp. on Antarctic Meteorites*, Tokyo, Japan, 1995, 265~268.
- 39 Xie Xiande, Chen Ming, Zhao Biqiang et al. The behavior of metallic phase in shocked chondrites. *Papers of 20th Symp. on Antarctic Meteorites*, Tokyo, Japan, 1995, 269~272.
- 40 Xie Xiande, Chen Ming. Na-redistribution in the melt phase of Yanzhuang meteorite. *Papers of 21th Symp. on Antarctic Meteorites*, Tokyo, Japan, 1996, 200~203.
- 41 Xie Xiande, Chen Ming. Dynamic high-pressure mineralogy: a new branch of mineralogy. In: *Developments in Geochemistry*. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 1996, 157~162.
- 42 Xie Xiande, Chen Ming. Shock-produced vapor-grown crystals in the Yanzhuang meteorite. *Science in China (Series D)*, 1997, 40: 113~119.
- 43 Xie X, Dai C, Chen M et al. A comparative study of naturally and experimentally shocked chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 1997, 32(suppl.): A 143.
- 44 Sharp T G, Lingemann C M, Dupas C et al. Natural occurrence of MgSiO_3 -ilmenite and evidence for MgSiO_3 -perovskite in a shocked L chondrite. *Science*, 1997, 277: 352~355.
- 45 Tomioka N, Fujino K. Natural $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ -ilmenite and perovskite in the Tenham meteorite. *Science*, 1997, 277: 1084~1086.
- 46 El Goresy A, Sharp T G, Wopenka B et al. A new very-high-pressure silica mineral in the Shergotty SNC meteorite: implications for shock metamorphism and the Earth's lower mantle. *LPS*, 1998, 29.
- 47 Agee C B. A new look at differentiation of the Earth from melting experiments on the Allende meteorite. *Nature*, 1990, 346: 834.
- 48 Agee C B, Li J, Shannon M C et al. Pressure-temperature phase diagram for the Allende meteorite. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 17723~17740.
- 49 Sharp T G, Chen M, El Goresy A. Mineralogy and microstructures of shock-induced melt veins in the Tenham (L6) chondrite. *LPS*, 1997, 28: 1283~1284.
- 50 Stöffler D. Minerals in the deep Earth: a message from the asteroid belt. *Science*, 1997, 278: 1576~1577.
- 51 Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes, I. Behavior of minerals under shock compressions. *Fortschr. Mineral.*, 1972, 49: 50~113.
- 52 Chao E C T. Pressure and temperature histories of impact metamorphosed rocks—based on petrographic observations. In: French B M, Short N M eds. *Shock metamorphism of Natural Materials*. Baltimore Md: Mono Book Corp., 1968. 135~158.
- 53 Stöffler D, Bischoff A, Buchwald V et al. *Shock effects in meteorites*. Tucson: The University of Arizona Press, 1988. 165~202.
- 54 Stöffler D, Keil K, Scott E R D. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, 55: 3845~3867.
- 55 Jeanloz R, Ahrens T J, Lalley J S et al. Shock produced olivine glass: first observation. *Science*, 1977, 197: 457~459.
- 56 Jeanloz R. Shock effects in olivine and implications for Hugoniot data. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 3163~3176.
- 57 Price G D, Putnis A, Agrell S O. Electron petrography of shock-produced veins in the Tenham chondrite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 71: 211~218.

世纪之交工艺矿物学的发展与展望

彭明生 梁金龙 李迪恩 张 恩 杨荣勇

(中山大学宝石矿物材料研究所, 广州 510275)

关键词 工艺矿物学 矿物物理与矿物材料 宝石矿物

矿物学发展史上的每一次突破无不与当时新理论和新技术的应用息息相关。作为矿物学应用学科的工艺矿物学的发展更是如此。1992 年在我国召开首次国际现代工艺矿物学和矿物工程进展会议,发表了有关量子理论在工艺矿物学研究中的应用文章^[1]。1995 年成立了中国矿物岩石地球化学学会工艺矿物学专业委员会后,将矿物物理学与工艺矿物学紧密结合。使这门应用学科不仅在选、冶、加工等方面的应用,而且在矿物材料、宝石矿物、环保、农业、医药等研究方面的应用都取得了新成果^[2,3]。

1 90 年代选、冶工艺矿物学的发展

传统工艺矿物学的任务是为矿石的可处理性提供矿物学评价,对矿山的生产流程作矿物学考察和故障分析。具体研究矿物中元素的赋存状态、矿物的嵌布粒度特征、镶嵌关系等。主要的研究手段是光学显微镜、化学分析方法、数理统计等。后来有了扫描电镜。从 60 年代后期工艺矿物学在我国建立到 70 年代后期,工艺矿物学的研究一直局限在为矿山的选矿流程提供宏观矿物学依据的范围内。由于研究手段落后,使一些伴生有价元素的赋存状态无法查明,有些根本发现不了,许多贵金属元素的回收率一直很低,矿床的综合利用率无法提高。80 年代后期,随着量子理论在矿物学上的应用,矿物谱学和微束分析手段的应用,使我们能更有效地弄清有用组分的成分、结构,电子结构、键性与其工艺性能之间的关系,以改进选、冶工艺,提高经济技术指标,并解决废料利用和环保问题。

1.1 贵金属的工艺矿物学研究

利用常规工艺矿物学方法结合谱学(电子顺磁共振谱、穆斯鲍尔谱、俄歇电子能谱、喇曼光谱)和微束技术,查明了康家湾铅锌矿床中 Ag 主要以深红银矿、硫锑铜银矿、脆银矿、银黝铜矿、淡红银矿、银金矿和金银矿等独立矿物赋存于方铅矿、闪锌矿中,占有率占 Ag 总量的 97% 以上,从而使矿山认识到只要在选矿过程中提高 Pb 和 Zn 的回收率,才能提高 Ag 回收率。并且利用喇曼光谱确定了火硫锑银矿和黄银矿分别是深红银矿和淡红银矿的同质多象矿物。

金的工艺矿物学与谱学研究表明,Au 主要以银金矿的形式分布于黄铁矿和方铅矿中,并首次发现毒砂和含砷黄铁矿中存在晶格金,终止了选矿,采用火冶炼的方法,把 Au 的回收率从 20%~25% 提高到 98.6%,仅此一项,年创经济效益达千万元以上。

1.2 柿竹园多金属矿的工艺矿物学研究

为了提高柿竹园矿中多金属元素综合利用,研究解决了 W、Mo、Bi 等的赋存状态,为提高其回收率作出了贡献。

(1)查明了长期困扰选矿工艺的“灰钨矿”实质上是具有云雾状,含黑钨矿、磁铁矿以及少量辉钼矿、辉铋矿等细微暗色矿物包裹体的白钨矿。这些包裹体粒径大都小于 0.019 mm,改变了白钨矿的可浮性,提高了钨的回收率和白钨矿的产品质量。

(2)首次在该矿床中发现了 3 个连续类质同象系列的矿物: $\text{MoS}_2\text{-(Mo,W)S}_2\text{-(W,Mo)S}_2\text{-WS}_2$; $\text{CaWO}_4\text{-Ca(W,Mo)O}_4\text{-Ca(Mo,W)O}_4\text{-CaMoO}_4$; $\text{MnWO}_4\text{-(Fe,Mn)WO}_4\text{-FeWO}_4$ 。并指出中间成员矿物的存在是影响 W、Mo 回收率 and 产品质量的因素之一。研究发现了灰钨矿(WS_2)这一世界稀有矿种,在国内尚属首次。这不仅指出对 W 的回收率有影响,而且灰钨矿的存在对柿竹园金属矿成因的研究有重要意义。

(3)应用红外光谱、喇曼光谱,结合群论分析指出白钨矿 Ca(W,Mo)O_4 中 Mo 的类质同象代替降低了捕收剂对矿物表面的粘附性,Mo 的存在不利于白钨矿的可浮性。

(4)红外光谱研究表明, V_1 振动模式的频率可作为区分黑钨矿 $(\text{Mn,Fe})\text{WO}_4$ 中 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 含量多少的标志,进而以此判断黑钨矿的可浮性。

(5)俄歇电子能谱研究表明,捕收剂与黑钨矿表面发生作用的吸附深度是 12 nm;吸附层与表面的作用是键性相联而非物理吸附; Mn^{2+} 是黑钨矿浮选的主要活化剂,矿物表面 Mn^{2+} 的增多会提高黑钨矿的浮选回收率。

由于谱学技术的应用,使得柿竹园多金属矿床综合利用中的技术难题从本质上得到解决。

1.3 大洋锰结核中自然镍的发现

对大洋锰结核的研究一直是海洋矿产资源研究的热点之一,前人已做了不少工作,但因其颗粒细、成分复杂,在锰结核中 Ni、Co、Cu 等 3 种元素的赋存状态,不同的学者看法不一。多数学者认为它们是以吸附状态存在于锰结核中。扫描电镜分析发现其中有呈橄榄状的独立矿物——自然镍。并首次报道了锰结核中自然镍的发现和 Mn^{2+} 存在。初步弄清了 Cu、Ni、Co 等有价值元素在锰结核中的赋存状态及分布情况,以及水在其中的存在形式。

2 与矿物材料学交叉、渗透是工艺矿物学的新生长点

量子理论和谱学手段的应用使得工艺矿物学走出了只为选矿与冶炼生产提供矿物学指导的狭窄天地,当今的应用研究更为广泛,特别是为发展矿物材料而开展的工艺矿物学研究,诸如化工填料、涂料、建筑材料、耐火材料、玻璃材料、过滤脱色材料、电子材料、电磁材料、能源材料、陶瓷材料、发光材料等等。工艺矿物学和矿物材料学这两大应用矿物学科的结合,不仅推动了国民经济和高新技术的发展,同时也极大地丰富了学科内容,成为工艺矿物学发展的又一充满生机和活力的生长点。

2.1 各种矿物材料性能的基础研究

魔角自旋核磁共振(MAS NMR)已广泛应用于长石、高岭土、蒙脱石和硅藻土中。研究长石中 Si、Al 的有序度和高岭土、蒙脱石和硅藻土中的氢状态,如弄清硅藻土中水的存在状态、特性及其在灼烧过程中的行为,对制定硅藻土的加工工艺有重要意义。魔角自旋核磁共振研究

表明,硅藻土中的活泼水与周围骨架产生弱的静电结合,因而易脱失,易回收。450℃之前脱失的是活泼水,550℃脱失的是一些粘土矿物的结构水,900℃之后测到的氢谱则属于回吸的活泼水和残存于硅藻微孔内的表面吸附水,结合红外光谱研究,弄清了脱水—吸水过程的机制。

为了对硅藻土的硅质骨架矿物微结构有更清晰的了解,做了硅藻土的 ^{29}Si 魔角自旋核磁共振谱研究。结果表明:(1)硅藻土与蛋白石的结构相类似,以 Q^4 硅环境为主,即以类似于非晶质的 SiO_2 为主,另有少量 Q^3 硅环境。(2)含有粘土矿物的 ^{29}Si MAS NMR 谱的信号,以高岭石的为主。(3)硅质骨架的热稳定性包括了 Q^3 硅环境和 Q^4 硅环境两部分。 Q^3 结构在900℃以下稳定,在900℃以上则转变为 Q^4 Si 结构。1 200℃以下主要表现为非晶质,1 200℃的谱线显示已变成方石英,此时硅质骨架已不复存在。

2.2 粘土矿物材料工艺

粘土矿物成本低、填充比例高、高增强度等功能条件一直是塑料行业选择填充体系的发展方向。用活性叶蜡石取代传统的轻质碳酸钙作填料生产的PVC(聚氯乙烯)板材除满足上述条件外,还节约了昂贵的树脂原料用量,大大降低了成本。“2:1型层状硅酸盐的羟基定位结构及其矿物材料科学意义”已引起人们极大的关注。

短纤维状硅灰石粉代替白炭黑增强NR/SBR,其拉伸强度、伸长率、磨耗等技术指标均达到国家标准。采用改性粘土粉料补强填料,其橡胶制品的性能指标均达国家一级运动鞋标准和白炭黑补强指标。在降低成本的同时,也提高了粘土矿物的应用价值,经济效益显著。

近年来陶瓷多孔材料已成为新型多孔材料中种类最多、用途最广、开发研究最热门的一种,可用于建筑吸音保温的轻质泡沫陶瓷、汽车尾气处理的蜂窝陶瓷、人造骨骼的生物陶瓷。具有高强度和化学性稳定等特点。预计在未来的生物材料中多孔陶瓷将是一个重要发展方向。

使用天然粉石英代替人工磨细的石英粉作为硅质原料来生产耐高温硅酸钙保温材料。每立方米产品的成本可降低200元。此项技术目前已在耐火材料厂实验初步获得成功。其产品性能指标如下:体积密度 220 kg/cm^3 ;最高使用温度 $1\ 000^\circ\text{C}$, $1\ 000^\circ\text{C}$ 以下3 h烧后线收缩1.5%;导热系数(常温) $0.04\sim 0.06\text{ W/m}\cdot\text{K}$,完全可以和美国、日本同类产品相媲美。为电厂研制的耐热、耐磨不定型材料具有密封性好、成本低、工艺简单,施工方便的特点,在低于 $1\ 200^\circ\text{C}$ 的环境下可替代刚玉制品及部分碳化硅制品,更可以取代铸石。

以铝磷酸盐、三氧化铬、水等为原料研制成高温辐射和隔热防腐涂料,把耐热温度提高到 500°C 以上,而且有效地克服了寿命短、附着力差和易剥脱等弱点。该研究成果已被厂家采用。

海泡石因具有特殊的孔道和很大的表面积,因而具有很强的吸附性能,被广泛应用于石油、化工、农业、医药等部门。近年来对海泡石的超细粉碎研究表明,外比表面积增加,内比表面积减小,总比表面积呈减小趋势。由于超细加工使海泡石外比表面积增大, Si-OH 表面含量增加,有利于对大分子吸附质的吸附。因此,超细加工海泡石是提高其对某些大分子吸附能力的有效途径。此外,海泡石还是很好的代石棉磨擦材料。

沸石是又一因有架状结构而具较强吸附能力的天然吸附材料。近年来研究者把沸石和镁、铝化合物按一定比例合成的系列FAM吸剂对P和Cr具有较好的吸附能力。P和Cr的除去率都在98%以上。饱和吸附剂再生后仍有较好的吸附能力,具有工业开发价值。

综上所述,工艺矿物学和矿物材料学已成为应用矿物学不可分的两大支柱,它们之间的交叉、融合将把应用矿物学带进一个崭新的发展天地。

3 宝石矿物材料的处理工艺

先进理论方法和测试手段同样是宝玉石学研究的有力工具,二者密切结合,相互促进是工艺矿物学近年来发展的又一显著特点。90年代初期的工艺矿物学论文集中仅见个别作者发表有关宝玉石研究方面的文章,到90年代中期,这一领域的工作已初步形成了格局。到目前为止,有关宝玉石成色机理、改色实验及优化处理等方面的研究已取得了不少成果,并有了专著,如《宝石优化处理与现代测试技术》。

许多学者利用谱学方法对我国东部沿海各省产出的蓝宝石呈色机理进行了系统研究,并对山东昌乐蓝宝石的呈色机理进行了重点研究,国家对山东蓝宝石的改色问题组织过“八五”攻关研究,取得了成果,已走进市场,产生了经济效益。

对阿尔泰海蓝宝石的研究指出,海蓝宝石中存在隧道水,并且指出 $[\text{Fe}^{2+}(\text{H}_2\text{O})]$ 或 $[\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}(\text{H}_2\text{O})]$ 是使海蓝宝石呈色的根本原因。并指出加热至900℃以上海蓝宝石颜色消失是隧道结构遭到破坏所致。指出若在浅色海蓝宝石中有 Fe^{3+} 存在,就可加深颜色。用顺磁共振谱查明了青金石 $(\text{Na}, \text{Ca})_3[\text{AlSiO}_4]_8[\text{SO}_4, \text{S}, \text{Cl}]_{1-2}$ 着色不是由过渡元素引起,而是由各种不同价态的硫离子(或基团)所致。

喇曼光谱、红外光谱和核磁共振谱研究广东台山黄玉中的羟基,得出黄玉的颜色主要是由于附加离子 OH^- 代替 F^- 引起的结构成色。当 $\text{F}^- \gg \text{OH}^-$ 时, OH^- 只有一种占位,无色透明,经中子辐射改色后呈蓝色;当 $\text{OH}^- > \text{F}^-$ 时, OH^- 有两种占位,容易产生空穴心,相同辐射条件下呈红色。这一研究表明,矿物的颜色不仅决定于阳离子性质和配位体的形态,还取决于阴离子引起的结构呈色。低色级的金刚石经优化可呈彩色或无色。随着经济的发展,优化宝玉石越来越为一般消费者所喜爱,工艺矿物学在这方面定有广阔的市场和喜人的发展前景。

4 工艺矿物学与环境保护

传统的工艺矿物学几乎不涉及环保领域。近年来,随着人们环境意识的增强,工艺矿物学用于环保研究开始受到重视。比如核废料的处置是核电站建设中首先要考虑的问题。“膨润土在核废物地质处置中的应用”一文阐明了膨润土对放射性元素的吸附是通过蒙脱石层间可交换的阳离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 进行,或粘土矿物表面双电层紧挨粘土颗粒表面带负电层对核素阳离子的吸附机制。实验证明,膨润土是吸附核废料中常见裂变元素 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{60}Co 及超铀元素 ^{239}Pu 、 ^{237}Np 和 ^{241}Am 等的理想材料。这一研究成果在我国的核电站建设中发挥了重要作用,也为膨润土的应用开辟了一个新领域。加硼催化脱硫的环境催化剂材料的研究也取得新的突破,并正在开发研究一个崭新的催化剂新材料 Ni-Mo/USY (ultrastable Y-type zeolite)。

5 工艺矿物学的研究成果的其他应用

工艺矿物学研究服务于农业生产是近年来开拓的又一研究领域。1993年开展了天然沸石与化肥混施作水稻底肥的试验,效果良好,可使当季增产17.18%~27.27%。实验指出,水稻底肥施沸石粉以150 g/m²效果较好;天然沸石与化肥混施,简便易行,可起到改良土壤,保蓄

土壤水分,调节植物营养,提高化肥利用率的功能,增产效果显著,具有广阔的应用前景。在药用方面所取得的成果也很多,并提出配方的科学化、数据化和制剂化的新方法。

6 工艺矿物学发展的展望

工艺矿物学在 90 年代的发展呈现出的两个突出特点:一是先进的基础理论与先进的测试手段的应用,这是工艺矿物学从宏观到微观,从为矿山服务到为国民经济建设各行各业服务的基础。如近年来我们通过对硅酸盐中 Al 同步辐射 X 射线吸收光谱的研究,弄清了 Al 的配位数,Al—O 键的键长和键角与其吸收峰位移之间的关系,证明在硬玉-钠长石的玻璃体系中,压力引起配位数由 4 次变成 5 次和 6 次,Al 的比例随玻璃中硬玉含量增大而增大,以及 Al 配位数与硅酸盐的密度、粘度、扩散系数之间的关系。研究高压条件下壳、幔物质的演化具有重要意义。“同步辐射 X 光吸收光谱及其在工艺矿物学上的应用”体现了新技术在矿物物理及工艺矿物学方面的应用成果。蓝晶石、红柱石、硅线石的化学成分相同,因局部结构不同,Al 的 K 边 XANES 分别为 1 568.2、1 567.8、1 566.0 eV,对应 Al 的配位数分别为 6、5、4。Al 的 K 边能量随着配位数增加而增大,化学键的强度增强,影响到这 3 种矿物的晶胞体积和比重。由此影响选矿工艺流程。二是工艺矿物学和其它学科的紧密结合。今天的工艺矿物学研究已不再满足于弄清其组分和结构、镶布粒度和嵌镶关系;工艺矿物学必须和在和其它各学科的紧密结合中,为国民经济服务,找到学科发展的新方向。

目前坡缕石涂敷型高档保温涂料,硬硅钙石型硅酸钙保温材料,橡胶塑料的功能填料——塞炭黑,尾砂的综合利用——玻化砖研制等应用成果,有的已申请了专利,有的已走向市场。目前工艺矿物学的发展不能满足社会发展的需要,应用研究超前和高科技的开发应用还不够。因此需要培育大量的人材,这是在世纪之交和下世纪初本学科发展所面临的亟待解决的问题。

21 世纪是海洋的世纪,工艺矿物学是有效开发海洋资源的有力武器之一;21 世纪是资源的世纪,资源的不可再生性,使开发新资源成为下个世纪面临的迫切任务之一,如矿山尾矿的再资源化,开发新的矿物资源和发现已有资源的新用途都是工艺矿物学的新任务;21 世纪是非金属材料的世纪,有人认为是人类历史上的“第二个石器时代”,开发非金属材料是工艺矿物学和其它相关学科在下个世纪所担负的重要使命。环境保护也是下世纪全人类面临的共同课题,工艺矿物学必将在这一领域中发挥其积极的作用。

参 考 文 献

- 1 Peng Mingsheng, Li Dien, Li Xungui. The Application of quantum theory in process mineralogy study. In: Proceedings of the First International Conference on Modern Process Mineralogy and Mineral Processing. International Academic Publishers, 1992. 67.
- 2 彭明生,张惠芬主编. 矿物物理与矿物材料新工艺. 广州:中山大学出版社,1995.
- 3 中国矿物岩石地球化学学会. 矿物岩石地球化学通报,1997,16(增刊).

成因矿物学找矿矿物学新进展

陈光远 孙岱生

(中国地质大学,北京 100083)

关键词 成因矿物学 找矿矿物学 矿物学填图

在 30 年来学科研究基础上,特别是通过 80 年代的大发展阶段(主要表现在学科理论体系的完善,应用的开拓,方法趋于系统,学科知识的普及),90 年代进入了进一步持续发展的时期,主要标志是:学科理论和方法走向国际,进入国际先进行列;学科研究更系统和深入,有关学术论著更为丰硕,研究领域更宽广;矿物学填图的应用领域扩大,方法更趋完善。

1 学科理论和方法走向国际,跻身于国际先进行列

成因矿物学与找矿矿物学作为矿物学的一个分支,已引起国际地学界的重视,而我国作为本学科研究的先进国家,已引起国际同行的瞩目。以上标志充分体现在两次国际大会上:1990 年第 15 届国际矿物学大会(IMA)的成因矿物学与找矿矿物学分会,收到 19 个国家的论文摘要共 131 篇,在所有分会中是收到文章最多的一个分会,说明本学科方向已得到国际的重视。其中我国提交论文摘要 62 篇,占总数的 53%;而(前)苏联提交 24 篇,占总数 24%;欧美国家占 12.2%;发展中国家占 10.8%。1996 年第 30 届国际地质大会矿物学专题共 7 个分会,其中成因矿物学及其应用分会收到 14 个国家论文摘要共 70 篇,也是 7 个分会中最多的,进一步说明本学科方向仍是国际注目的焦点。我国提交论文与摘要 36 篇,专著一部,占总数的 44.45%;俄罗斯提交 25 篇,占总数的 30.90%;欧美国家占总数的 22%,其他发展中国家仅占 2.65%。我国提交的论著与摘要不仅数量多、研究领域广,并有一定的深度,而且在某些方面已达到国际先进水平。

2 学科研究更系统、学术论著更丰硕、研究领域更宽广

八九十年代是我国金矿研究的高潮,已有一系列金矿专著问世,特别是矿床成因矿物学与找矿矿物学研究,如《内蒙古白乃庙金矿成因矿物学找矿标志》(薛君治,1994)、《佳木斯地块金矿找矿矿物学》(靳是琴,1994)、《胶东灵山沟金矿成因矿物学》(陈光远、黄绍峰等,1995)、《胶东乳山金矿田成因矿物学》(李胜荣、陈光远等,1996)。以上专著特点都是在地质基础研究前提下,应用成因矿物学对矿床进行判断并建立有关找矿标志,说明本学科研究进一步深化。这些专著虽然是对某一矿区的著作,对该区金矿有理论与找矿意义,对其他地区金矿,甚至其他矿种的研究,也有借鉴意义。